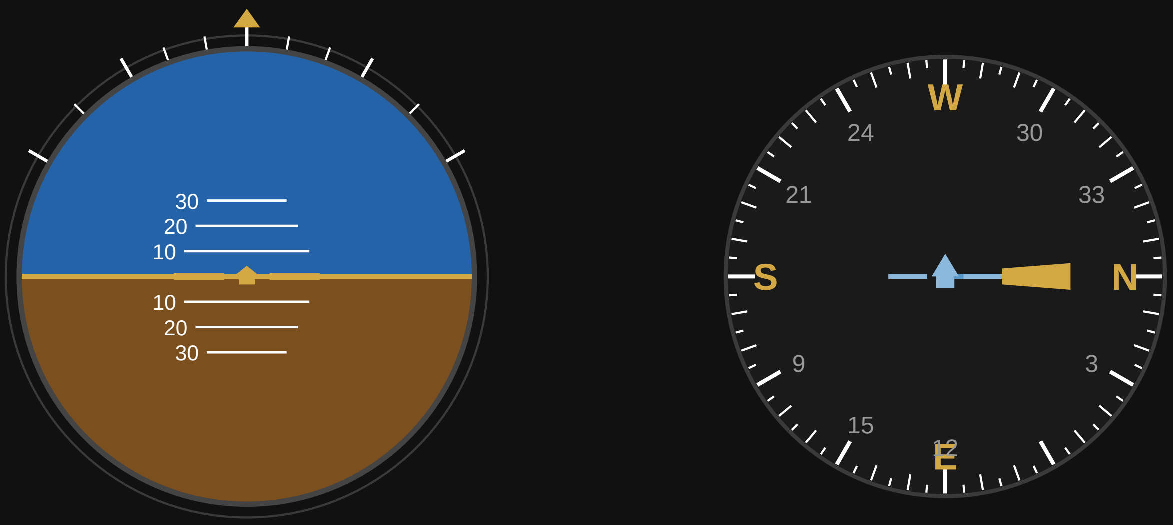

ϕ 0.0° θ 0.0°
Künstlicher Horizont (ϕ, θ)

ψ 270°
Steuerkurs ψ (Heading)

GPS POSITION DEGRADED

Trägheitsnavigation aktiv · Positionsfehler wächst

Blind fliegen?

Was passiert, wenn GPS ausfällt – und was die Technik dagegen tut

Dipl.-Inform. (FH) Gerd Schmitt
info@sc-sarl.com

Blind fliegen?

Was passiert, wenn GPS ausfällt – und was die Technik dagegen tut

*Für alle, die schon mal im Flugzeug saßen und sich gefragt haben:

Was hält uns hier oben eigentlich auf Kurs?*

Einleitung – Eine ruhige Nacht über der Ostsee

Es ist 3:17 Uhr morgens. Irgendwo zwischen Helsinki und Hamburg, auf Reiseflughöhe von 11.000 Metern, schläft der größte Teil der 180 Passagiere an Bord. Wer noch wach ist, schaut aus dem Fenster in absolute Schwärze – keine Lichter, kein Horizont, nur die blinkenden Positionslichter des eigenen Flügels, die sich im Glas spiegeln.

Im Cockpit herrscht die ruhige Konzentration einer langen Nachtstrecke. Der Erste Offizier trinkt seinen dritten Kaffee. Der Kapitän überprüft routinemäßig die Instrumente.

Dann, ohne Vorwarnung, ohne Knall, ohne irgendein dramatisches Ereignis: Ein kleines Symbol auf dem Navigationsbildschirm wechselt die Farbe. Gelb. Eine dezente Meldung erscheint: *GPS POSITION DEGRADED.*

Das GPS-Signal ist weg.

Nicht ausgefallen wie ein Licht, das ausgeht. Einfach – unzuverlässig geworden. Irgendwo dort unten, auf einem Flugzeugträger oder in einem unscheinbaren Fahrzeug an einer Küstenstraße, sendet ein Gerät Funksignale aus, die die GPS-Satellitensignale überdecken. Ein Störsender. Absichtlich. Präzise. Wirkungsvoll.

Was passiert jetzt?

Das ist die Frage, um die sich dieses Buch dreht. Nicht als Thriller – obwohl die Geschichte durchaus Spannung hat. Sondern als ehrliche, verständliche Antwort auf etwas, das Millionen von Flugreisenden betrifft und das in den Nachrichten zunehmend auftaucht, ohne dass jemand wirklich erklärt, was dahintersteckt.

Dieses Buch erklärt es. Ohne Formeln im Fließtext. Ohne Ingenieursstudium als Voraussetzung. Aber auch ohne falsche Vereinfachungen, die mehr vernebeln als erhellen.

Am Ende werden Sie verstehen, was in jener Nacht über der Ostsee wirklich passiert – technisch, menschlich, und politisch. Und Sie werden eine Antwort auf die Frage haben, die vermutlich schon länger in Ihnen schlummert: *Wie gefährlich ist das eigentlich?*

Die Antwort ist: Es kommt darauf an. Und worauf es ankommt, das ist genau das, wovon dieses Buch handelt.

Kapitel 1 – Was GPS wirklich ist (und was nicht)

Das Missverständnis, das fast jeder hat

Fragen Sie zehn Menschen auf der Straße, was GPS macht, und neun werden antworten: „GPS navigiert." Es zeigt an, wo man ist. Es berechnet die Route. Es sagt, wann man abbiegen soll.

Das stimmt alles – aber es beschreibt eigentlich die App auf Ihrem Telefon, nicht GPS selbst.

GPS – das *Global Positioning System* – macht in Wahrheit etwas viel Bescheideneres und gleichzeitig Eleganteres: Es liefert vier Zahlen. Breitengrad. Längengrad. Höhe. Und die genaue Uhrzeit. Das war's.

Was Ihr Telefon, Ihr Navigationssystem oder ein Flugzeug-Autopilot daraus macht – die Route, die Karte, der Kurs – das ist die Leistung der Software. GPS selbst ist nur ein hochpräziser, weltweiter Taktgeber und Positionslieferant.

Warum ist das wichtig? Weil man nur dann verstehen kann, was bei einem GPS-Ausfall verloren geht, wenn man verstanden hat, was GPS überhaupt liefert.

Wie GPS funktioniert – in drei Minuten

Stellen Sie sich vor, Sie stehen mitten in einer riesigen Halle und wollen wissen, wo genau Sie stehen. In der Halle hängen an der Decke dreißig Lautsprecher, die alle gleichzeitig ihren Namen ansagen und dabei einen präzisen Taktschlag mitgeben.

Wenn Sie hören, dass Lautsprecher A seinen Taktschlag 0,0001 Sekunden früher bei Ihnen ankommt als Lautsprecher B, dann wissen Sie: Sie stehen näher an A als an B. Mit genug Lautsprechern und präzisen Uhren können Sie Ihren Standort auf wenige Zentimeter genau berechnen.

Genau das machen GPS-Satelliten. Es sind etwa dreißig aktive Satelliten, die in etwa 20.000 Kilometern Höhe die Erde umkreisen. Jeder sendet ununterbrochen ein Signal, das im Wesentlichen sagt: *Ich bin Satellit Nr. 14, und es ist jetzt genau 03:17:42.000000 Uhr.*

Ihr GPS-Empfänger hört mindestens vier dieser Signale gleichzeitig. Aus den winzigen Zeitunterschieden, mit denen die Signale ankommen, berechnet er seinen Standort. Drei Satelliten würden für eine Position in der Ebene reichen – der vierte löst die Mehrdeutigkeit in der Höhe auf und korrigiert die Ungenauigkeit der eigenen Uhr.

Das Ergebnis: Position auf etwa drei bis fünf Meter genau, weltweit, zu jeder Zeit, bei jedem Wetter. Eine ingenieurswissenschaftliche Meisterleistung, die so alltäglich geworden ist, dass wir sie für selbstverständlich halten.

Was GPS nicht liefert

Hier kommt die entscheidende Einschränkung, die in den meisten Erklärungen fehlt:

GPS sagt Ihnen, wo Sie sind. Es sagt Ihnen nicht, wie Sie sich fühlen.

Das klingt seltsam für ein technisches System – aber es trifft den Kern. Ein GPS-Empfänger weiß nichts davon, ob das Flugzeug gerade rollt, nickt oder steigt. Er weiß nicht, in welche Richtung die Nase zeigt. Er weiß nicht, ob das Flugzeug ruhig liegt oder turbulenzgeschüttelt wird.

Er kennt nur die Position – und wenn man zwei aufeinanderfolgende Positionen vergleicht, kann man daraus die Geschwindigkeit und grob die Richtung ableiten. Aber das ist eine Ableitung, keine direkte Messung.

Für einen Autopiloten oder einen Piloten, der das Flugzeug stabil halten will, reicht das nicht. Er braucht zu jedem Zeitpunkt die *Lage* des Flugzeugs im Raum: Wie weit ist der linke Flügel nach unten geneigt? Steigt die Nase oder sinkt sie? Dreht sich das Flugzeug nach rechts?

Diese Informationen liefert GPS schlicht nicht. Dafür gibt es eine ganz andere Technologie – eine, die schon flog, bevor der erste GPS-Satellit je gestartet wurde.

Was GPS-Ausfall wirklich bedeutet

Wenn über der Ostsee das GPS ausfällt, verliert das Flugzeug also nicht seinen Horizont, nicht sein Steuer, nicht seine Lage. Es verliert die präzise Positionsinformation.

Das ist ein Unterschied, der zählt. Ein Flugzeug ohne GPS ist nicht blind. Es ist – um im Bild zu bleiben – wie ein erfahrener Wanderer, der seine GPS-Uhr vergessen hat. Er weiß immer noch, wie er geht, wie er sich hält, wie schnell er läuft. Er weiß nur nicht mehr ganz genau, wo auf der Karte er gerade ist.

Wie lange er sich orientieren kann, bevor er sich verläuft – das hängt davon ab, welche anderen Instrumente er hat. Und genau darum geht es in den nächsten Kapiteln.

Kapitel 2 – Das Flugzeug spürt sich selbst

Navigation ohne Satelliten – eine alte Kunst

Am 21. Februar 1921 startete in New York ein Postflugzeug und landete – ohne jede externe Hilfe, ohne Funk, ohne Bodenstation – am geplanten Zielort in San Francisco. Der Pilot navigierte mit Karte, Kompass, Stoppuhr und dem Gefühl für Wind und Geschwindigkeit. Koppelnavigation nennt man das: Man weiß, wo man gestartet ist, man kennt Kurs und Geschwindigkeit, und man rechnet aus, wo man sein muss.

Diese Methode funktioniert. Aber sie akkumuliert Fehler. Jede kleine Ungenauigkeit beim Kurs, jede unterschätzte Windböe, jede falsch abgelesene Geschwindigkeit summiert sich. Über kurze Distanzen sind die Fehler vernachlässigbar. Über den Atlantik können sie Hunderte von Kilometern betragen.

Für die transkontinentale und ozeanische Luftfahrt brauchte man etwas Besseres. Man fand es in einem physikalischen Prinzip, das Isaac Newton schon im 17. Jahrhundert kannte, das aber erst in den 1950er Jahren als praktisches Navigationssystem realisiert werden konnte: Trägheitsnavigation.

Trägheit als Navigationsprinzip

Trägheit ist die Tendenz eines Körpers, seinen Bewegungszustand beizubehalten. Ein rollendes Billardkugelgeht geradeaus, bis eine Kraft sie ablenkt. Ein fliegendes Flugzeug behält seinen Kurs, bis Triebwerk, Ruder oder Wind etwas ändern.

Das Interessante: Wenn man die einwirkenden Kräfte kennt, kann man ausrechnen, wie sich die Bewegung verändert. Und Kräfte kann man messen – mit einem Beschleunigungsmesser, dem sogenannten Accelerometer.

Ein Gyroskop misst dazu die Drehrate: Wie schnell dreht sich das Flugzeug um seine eigene Achse? Rollt es nach links? Nickt die Nase nach unten?

Zusammen bilden drei Beschleunigungsmesser und drei Gyroskope – je einer pro Raumachse – eine *Inertiale Messeinheit*, kurz IMU. Mit ihr kann ein Computer in jedem Moment berechnen:

- Wie ist das Flugzeug gerade geneigt?
- Wie schnell verändert sich diese Neigung?

- In welche Richtung beschleunigt es?

Und wenn man das alles kennt und dazu weiß, wo man gestartet ist, kann man Position und Lage jederzeit berechnen – ganz ohne GPS, ganz ohne externe Signale.

Von der Kreiselmechanik zum Siliziumchip

Frühe Trägheitsnavigationssysteme waren mechanische Wunderwerke. Präzisionskreisel, in kardanischen Aufhängungen montiert, behielten ihre Ausrichtung im Raum bei – egal wie sich das Flugzeug bewegte. Diese Systeme waren groß, schwer, teuer und empfindlich. Sie kosteten mehr als ein Kleinwagen, und ein einziger Sandkorn im falschen Lager konnte die Präzision ruinieren.

Heute sieht das anders aus. Dank der Miniaturisierung der Halbleitertechnik gibt es Gyroskope und Beschleunigungsmesser, die auf einem Chip sitzen, der nicht größer ist als ein Fingernagel. Sie heißen MEMS-Sensoren – *Micro-Electro-Mechanical Systems*. Winzige mechanische Strukturen, geätzt in Silizium, so dünn wie ein menschliches Haar.

Wie ein MEMS-Gyroskop funktioniert

Stellen Sie sich eine winzige Stimmgabel vor – zwei schwingende Zinken, präzise in Resonanz gebracht. Wenn sich die Stimmgabel dreht, lenkt die Corioliskraft die Zinken aus ihrer Schwingungsebene ab. Diese winzige Auslenkung wird elektrisch gemessen. Das Ergebnis: eine Drehrate, präzise auf Bruchteile von Grad pro Sekunde.

Dasselbe Prinzip, das früher Kreiseln mit Diamantlagern vorbehalten war, steckt heute in jedem Smartphone – damit der Bildschirm weiß, ob Sie das Gerät quer oder hochkant halten.

Ein moderner MEMS-Sensor kostet wenige Euro, wiegt Gramme und liefert Messwerte mit einer Rate von tausend Mal pro Sekunde. Er passt auf eine Platine, die in einen Briefumschlag passt.

Das klingt nach einer perfekten Lösung. Und wäre es auch – wenn da nicht ein fundamentales Problem wäre, das in der Physik tief verwurzelt ist und das keine Ingenieurkunst der Welt vollständig lösen kann.

Das unvermeidliche Problem: Rauschen und Drift

Kein Sensor misst perfekt. Jede Messung enthält Rauschen – kleine, zufällige Abweichungen vom wahren Wert. Bei einem Thermometer, das statt 20,0 °C mal 19,8 °C und mal 20,2 °C anzeigt, ist das harmlos.

Bei einem Gyroskop ist es eine andere Geschichte.

Der Strapdown-Algorithmus – so heißt das Verfahren, mit dem ein Computer aus Sensor-Messwerten Lage und Position berechnet – *integriert* die Drehrate. Das bedeutet: Er addiert jeden einzelnen Messwert über die Zeit auf. Was sich klein anhört, hat eine unangenehme Eigenschaft: Fehler addieren sich.

Wenn das Gyroskop in jeder Sekunde einen zufälligen Fehler von 0,01 Grad macht, dann ist nach 100 Sekunden der angesammelte Lagefehler schon 1 Grad. Nach 1000 Sekunden sind es 10 Grad. Das Flugzeug glaubt, geradeaus zu fliegen – aber die berechnete Lage weicht immer weiter von der Wirklichkeit ab.

Noch schlimmer ist der *Bias* – ein systematischer Fehler, der nicht zufällig streut, sondern konstant in eine Richtung zieht. Ein Gyroskop mit einem winzigen Bias von 0,1 Grad pro Stunde macht nach 10 Stunden einen Fehler von 1 Grad in der Lage. Und dieser Fehler wächst ohne GPS-Korrektur unaufhörlich weiter.

Eine Analogie

Stellen Sie sich vor, Sie navigieren durch eine Stadt mit verbundenen Augen. Ein Freund flüstert Ihnen alle zwei Sekunden: „Jetzt zehn Schritte geradeaus. Jetzt links abbiegen, 90 Grad. Jetzt fünf Schritte." Sie folgen exakt seinen Anweisungen.

Aber Ihr Freund macht jedes Mal einen kleinen Fehler: Seine „90 Grad" sind vielleicht 91 Grad. Seine „zehn Schritte" sind neun und einen halben. Jeder Fehler für sich ist trivial. Aber nach zwanzig Abbiegungen sind Sie Hunderte von Metern vom geplanten Weg entfernt – ohne es zu wissen.

Das ist Trägheitsnavigation ohne Korrektursignal.

Genau hier liegt die Crux. Eine IMU allein kann ein Flugzeug nicht dauerhaft präzise navigieren. Sie kann es kurzfristig stabil halten – sehr gut sogar. Aber ohne ein externes Korrektursignal, das den anwachsenden Fehler immer wieder auf null zurückstellt, driftet die Lösung.

GPS liefert genau dieses Korrektursignal. Es aktualisiert die Position viermal pro Sekunde und verhindert, dass der Fehler wächst.

Wenn GPS ausfällt, beginnt die Uhr zu ticken.

Kapitel 3 – Das Problem mit der Zeit: Warum Fehler wachsen

Eine Minute ist harmlos. Eine Stunde ist gefährlich.

Wenn über der Ostsee das GPS ausfällt, ist in der ersten Minute wenig zu merken. Das Flugzeug fliegt stabil. Die Lage – Roll, Nick, Gier – ist weiterhin sehr präzise bekannt, weil die Trägheitssensoren das kurzfristig ausgezeichnet können. Die Position driftet ein wenig, aber noch in harmlosen Größenordnungen.

Nach fünf Minuten ist der Positionsfehler schon deutlich spürbar – auf dem Navigationsdisplay könnten ein bis zwei Kilometer Abweichung stehen.

Nach einer halben Stunde sprechen wir von zweistelligen Kilometerfehlern, wenn keine andere Korrektur stattfindet.

Nach einer Stunde ist die Trägheitsnavigation für präzise Zwecke weitgehend unbrauchbar.

Diese Zeitkurve ist keine Schwäche billigerer Systeme. Sie ist ein fundamentales physikalisches Phänomen. Selbst die teuersten militärischen Trägheitsnavigationssysteme, die sechsstellige Summen kosten, driften irgendwann. Die Frage ist nur, wie schnell.

Warum Fehler nicht einfach klein bleiben

Der Grund liegt in der Mathematik der Integration. Wer das Wort Integration aus der Schule noch im Kopf hat, kann es gerne einsetzen – wer nicht, hier ist die Essenz:

Wenn ein Gyroskop die Drehrate misst, um daraus den aktuellen Winkel zu berechnen, muss es alle bisherigen Messungen aufaddieren. Stell dir vor, du willst wissen, wie weit du gegangen bist – nicht durch direktes Messen der Distanz, sondern indem du jeden einzelnen Schritt zählst und aufaddierst. Das funktioniert. Aber jeder Zählfehler summiert sich.

Jetzt, um die Position zu berechnen, braucht man noch einen Schritt mehr: Man integriert die Beschleunigung, um die Geschwindigkeit zu erhalten. Und dann integriert man noch einmal die Geschwindigkeit, um die Position zu erhalten. Zwei aufeinanderfolgende Aufaddierungen.

Das hat eine unangenehme Eigenschaft: Fehler wachsen nicht linear, sie wachsen mit dem Quadrat der Zeit. Ein kleiner Fehler in der Beschleunigungsmessung, der nach einer Minute noch völlig harmlos ist, kann nach zehn Minuten hundertfach größer sein.

Das Bild des leckenden Eimers

Stellen Sie sich einen Eimer mit einem winzigen Loch vor. Pro Stunde verliert er einen Liter. Nach einer Stunde fehlt ein Liter – kaum bemerkenswert. Aber das Loch wird nicht kleiner; es bleibt gleich. Nach zehn Stunden fehlen zehn Liter. Das Defizit wächst stetig.

Jetzt stellen Sie sich vor, das Loch wächst mit der Zeit. Das ist das Verhalten von Navigationsfehlern bei doppelter Integration. Der Fehler wächst und wächst – und zwar immer schneller.

Was das konkret bedeutet: Drei Szenarien

Szenario 1: Kurzer Ausfall, 30 Sekunden.

Das GPS-Signal fällt kurz aus und kommt wieder – etwa beim Überflug eines stark bewölkten Gebiets oder einer kurzen Störzone. Die Trägheitsnavigation überbrückt das problemlos. Positionsfehler im einstelligen Meterbereich. Für den Piloten kaum relevant. Systeme wie diese sind für genau solche kurzen Unterbrechungen konzipiert.

Szenario 2: Mittlerer Ausfall, 2–5 Minuten.

Das GPS bleibt weg, etwa in einem Störgebiet. Die Trägheitsnavigation hält das Flugzeug stabil und liefert eine brauchbare, aber zunehmend ungenaue Position. Abweichungen im Bereich einiger hundert Meter bis zu einem Kilometer. Der Pilot weiß, dass er sich in einem Korridor befindet – aber wo genau in diesem Korridor, wird unsicherer. Für den Reiseflug über freiem Wasser unkritisch. In der Nähe von Bergen oder beim Anflug auf einen Flughafen beginnt es ungemütlich zu werden.

Szenario 3: Langer Ausfall, 10 Minuten und mehr.

Jetzt wird es ernst – nicht für das Flugzeug selbst, aber für die Präzision der Navigation. Fehler im Kilometerbereich. Der Flughafen ist noch sicher erreichbar, aber präzise Anflugrouten lassen sich nicht mehr einhalten. Ausweichen auf andere Navigationsquellen ist jetzt nicht mehr optional, sondern zwingend.

Die gute Nachricht: GPS ist nicht die einzige Quelle

Wer dieses Buch bis hierher gelesen hat, könnte den Eindruck gewinnen: Ohne GPS ist ein modernes Flugzeug verloren.

Das stimmt nicht. Es stimmt sogar in mehrerlei Hinsicht nicht.

Erstens haben moderne Verkehrsflugzeuge redundante Navigationssysteme. Mehrere unabhängige IMUs, deren Fehler man statistisch gegeneinander abwägen kann. Trägheitsnavigationssysteme der Hochpräzisionsklasse, die erheblich langsamer driften als billige MEMS-Chips. Und eine ganze Reihe weiterer Hilfsmittel.

Zweitens gibt es bodengebundene Navigationshilfen – VOR-Funkfeuer, DME-Entfernungsmesser, ILS-Landehilfssysteme – die von GPS völlig unabhängig arbeiten und über die gesamte Welt verteilt sind. Zwar sind manche dieser Systeme in abgelegenen Gebieten dünn gesät, aber auf den Hauptverkehrsrouten über Europa und dem Nordatlantik ist die Abdeckung ausgezeichnet.

Drittens – und das ist das eigentliche Thema dieses Buches – gibt es moderne Filteralgorithmen, die das Beste aus allen verfügbaren Quellen herausholen und den Fehler radikal reduzieren, solange GPS weg ist.

Wie das geht, erklärt das nächste Kapitel. Und es ist, ehrlich gesagt, eines der schönsten Beispiele dafür, wie Mathematik ein praktisches Problem elegant lösen kann – ohne dass man ein einziges Symbol kennen muss, um es zu verstehen.

Ende Teil A (Einleitung, Kapitel 1–3)

Kapitel 4 – Der misstrauische Navigator

Zwei Zeugen, zwei Aussagen, eine Wahrheit

Stellen Sie sich folgende Situation vor: Sie sind Detektiv und ermitteln, wo genau sich ein Verdächtiger um Mitternacht befunden hat. Sie haben zwei Zeugen.

Zeuge A ist präzise, aber unzuverlässig. Er sagt: „Er stand exakt auf dem zweiten Pflasterstein von links, dritte Reihe." Aber dieser Zeuge hat eine bekannte Schwäche: Er erinnert sich manchmal falsch, und je länger er nachdenkt, desto weiter entfernt sich seine Aussage von der Wahrheit.

Zeuge B ist unscharf, aber beständig. Er sagt: „Er stand irgendwo in der Nähe der Laterne, ungefähr hier." Er zeigt auf ein Gebiet von etwa zehn Quadratmetern. Ungenau – aber konstant. Zeuge B weiß, was er weiß, und er verändert seine Aussage nicht.

Welchem glauben Sie? Einem allein zu vertrauen wäre ein Fehler. Die kluge Antwort ist: Sie kombinieren beide Aussagen. Die Präzision von Zeuge A, gewichtet mit dem Wissen, dass er mit der Zeit unzuverlässiger wird. Die Beständigkeit von Zeuge B, gewichtet mit seiner inhärenten Unschärfe.

Genau das macht der Kalman-Filter. Er ist der misstrauische, aber faire Detektiv der Navigation.

Was der Kalman-Filter wirklich ist

Rudolf Kálmán war ein ungarisch-amerikanischer Mathematiker, der 1960 einen Aufsatz veröffentlichte, der die angewandte Mathematik für immer veränderte. Sein Filter – ein Algorithmus, der mehrere unsichere Messquellen optimal kombiniert – wurde so schnell so wichtig, dass er bereits das Apollo-Mondlandeprogramm ermöglichte. Ohne Kalman-Filter wäre Neil Armstrong 1969 nicht auf dem Mond gelandet.

Heute steckt der Kalman-Filter in jedem Smartphone, in jedem Navigationssystem, in jedem modernen Flugzeug. Er ist einer der meistimplementierten Algorithmen der Geschichte.

Seine Grundidee lässt sich in einem Satz zusammenfassen:

Vertraue keiner Quelle blind. Gewichte jede Quelle nach ihrer aktuellen Zuverlässigkeit – und aktualisiere diese Gewichtung mit jeder neuen Information.

Der misstrauische Navigator – eine Analogie

Stellen Sie sich einen erfahrenen Navigationsoffizier auf einem Schiff vor, das durch dichten Nebel fährt. Er hat zwei Hilfsmittel:

Erstens sein Logbuch. Darin steht, wo das Schiff vor einer Stunde war, wie schnell es fuhr und in welche Richtung. Aus diesen Daten kann er ausrechnen, wo das Schiff jetzt sein *sollte*. Das ist seine Vorhersage – sie ist gut, aber nicht perfekt, weil Strömungen und kleine Kurskorrekturen nicht vollständig erfasst sind.

Zweitens ein Radar, das ab und zu durch den Nebel ein Küstenprofil erkennt. Diese Messung ist unscharf – der Nebel verzerrt das Bild – aber sie ist eine unabhängige Information, die nichts mit dem Logbuch zu tun hat.

Was macht der Navigator? Er vergleicht seine Vorhersage mit der Radar-Messung. Wenn beide übereinstimmen: gut, er vertraut seiner Vorhersage. Wenn sie abweichen: er gewichtet. Wie zuverlässig ist gerade das Radar? Wie alt ist die letzte Logbucheintragung? Er verschiebt seine Schätzung in Richtung der vertrauenswürdigeren Quelle.

Und dann – das ist der entscheidende Schritt – aktualisiert er sein Logbuch mit der neuen kombinierten Schätzung. Beim nächsten Vergleich fängt er nicht von vorne an. Er lernt aus jeder Messung.

Das ist der Kalman-Filter. Nicht mehr und nicht weniger.

Im Flugzeug: IMU und GPS als zwei Zeugen

Übertragen auf unser Flugzeug:

Die IMU ist Zeuge A: hochpräzise, schnell, liefert tausend Mal pro Sekunde einen Messwert – aber akkumuliert über Zeit Fehler, die wachsen und wachsen.

GPS ist Zeuge B: liefert nur viermal pro Sekunde einen Messwert, ist träger, kann gestört werden – aber macht keine Fehler, die sich akkumulieren. Jede GPS-Messung ist unabhängig von der vorherigen.

Der Kalman-Filter kombiniert beide. In jedem Moment weiß er:

- Wie lange läuft die IMU schon ohne Korrektur? (Wenn lange: ihr weniger vertrauen)
- Wie gut ist das GPS-Signal gerade? (Wenn schlecht: GPS weniger vertrauen)
- Was ist die wahrscheinlichste Wahrheit, wenn man beides gewichtet kombiniert?

Das Ergebnis ist besser als jede der beiden Quellen allein.

Was passiert, wenn GPS ausfällt?

Wenn GPS ausfällt, verliert der Kalman-Filter einen seiner Zeugen. Er arbeitet weiter – aber jetzt nur noch mit der IMU. Und er *weiß*, dass er nur noch einen Zeugen hat. Er weiß, dass seine Schätzung unsicherer wird.

Modern implementierte Systeme führen intern eine Zahl mit sich, die man sich als „Vertrauensradius" vorstellen kann: In welchem Bereich liegt die wahre Position wahrscheinlich? Dieser Radius wächst, wenn GPS ausfällt – langsam am Anfang, dann schneller.

Der Pilot sieht auf seinem Display nicht nur eine Position, sondern auch eine Anzeige, wie zuverlässig diese Position ist. Ein gewissenhaftes System zeigt ihm: „Ich kenne meine Position – aber nur noch auf 500 Meter genau." Und fünf Minuten später: „Nur noch auf zwei Kilometer genau."

Das ist kein Versagen des Systems. Das ist das System, das ehrlich kommuniziert, was es weiß und was nicht. Und ehrliche Unsicherheitsangaben sind in der Navigation Gold wert.

Wie gut kann es werden?

Hier kommen die Zahlen aus einem realen Projekt, das die Grundlage dieses Buches bildet: In einem Flugsimulator wurde ein modernes GPS/IMU-Navigationssystem mit einem Kalman-Filter aufgebaut und getestet. Das System wurde einem kontrollierten GPS-Ausfall ausgesetzt, der 150 Sekunden – zweieinhalb Minuten – dauerte.

Das Ergebnis:

- **Ohne Kalman-Filter:** 1258 Meter Positionsfehler nach 150 Sekunden.
- **Mit Kalman-Filter:** 37 Meter Positionsfehler nach 150 Sekunden.

Faktor 34. Nicht als theoretischer Wert – als gemessenes Ergebnis, reproduzierbar, in zwanzig verschiedenen Testszenarien bestätigt.

37 Meter. Das ist weniger als die Länge eines Fußballfeldes. Nach zweieinhalb Minuten GPS-Ausfall.

Das ist der Unterschied, den ein gut implementierter Kalman-Filter macht.

Kapitel 5 – Was passiert in den ersten 30 Sekunden?

Zurück zur Nacht über der Ostsee

Das GPS-Symbol leuchtet gelb. *GPS POSITION DEGRADED.*

In diesem Moment passieren mehrere Dinge gleichzeitig – in den Systemen, im Cockpit und in den Köpfen der Piloten.

Die ersten drei Sekunden: Automatische Umschaltung

Moderne Verkehrsflugzeuge haben nicht ein GPS, sondern mehrere. Ein Airbus A320 etwa betreibt drei voneinander unabhängige Trägheitsnavigationssysteme (IRS – Inertial Reference Systems) und kann mehrere GPS-Empfänger nutzen. Diese Systeme arbeiten ständig parallel und vergleichen ihre Ergebnisse.

Wenn eines der GPS-Signale wegfällt oder unplausibel wird, schalten die Systeme in den ersten Sekunden automatisch um. Das *Flight Management System* (FMS) – der Bordcomputer, der den Flug plant und überwacht – registriert den Ausfall und beginnt sofort, die Navigationsgenauigkeit aus mehreren verbleibenden Quellen zu schätzen.

Der Pilot sieht eine Warnanzeige. Aber das Flugzeug fliegt weiter. Nichts wackelt. Nichts kippt. Der Autopilot hält den Kurs.

Sekunde 10 bis 30: Situationsbewusstsein herstellen

Jetzt ist der Pilot gefragt – nicht als Reaktion auf einen Notfall, sondern als routinierte Ausführung erlernter Verfahren. Checklisten existieren für genau diese Situation. Sie sind trainiert, regelmäßig geübt, und in der Praxis so verinnerlicht, dass ein erfahrener Kapitän sie im Halbschlaf abarbeiten kann.

Was passiert konkret? Der Pilot stellt fest, welche Navigationssysteme noch arbeiten. Er prüft, ob die Trägheitsnavigationssysteme (IRS) unbeeinträchtigt sind – sie sind es, weil GPS-Störung das IRS nicht betrifft. Er prüft, ob bodengebundene Navigationsquellen verfügbar sind: VOR-Funkfeuer, DME-Entfernungsmesser.

Über der Ostsee, auf einer Hauptverkehrsroute, sind diese Signale fast immer vorhanden. Die Navigation ist eingeschränkt, aber bei weitem nicht blind.

Was der Autopilot macht – und was er nicht mehr tut

Der Autopilot eines modernen Verkehrsflugzeugs ist kein einziges System, sondern ein Verbund aus mehreren Steuerungsmodulen, die ineinander greifen. Vereinfacht gesagt gibt es zwei Ebenen:

Die **Lageregelung** hält das Flugzeug stabil: Roll, Nick, Gier werden durch die IMU-Daten kontrolliert. Diese funktioniert völlig unabhängig von GPS und arbeitet weiter, als wäre nichts gewesen.

Die **Kurshaltung und Navigation** – also die Fähigkeit, einem geplanten Flugweg zu folgen – hängt von der Positionsinformation ab. Hier merkt der Autopilot den Unterschied. Er kann weiterhin einen Kurs halten (eine Richtung fliegen), aber er kann nicht mehr auf den Meter genau einem geplanten Routenpunkt folgen, wenn die Position unsicher wird.

In der Praxis bedeutet das: Der Autopilot hält das Flugzeug in der Luft und auf grob dem richtigen Kurs. Aber die feine Präzision geht verloren.

Die menschliche Seite: Training und Gelassenheit

Was in dieser Szene vielleicht am meisten überrascht: Für gut ausgebildete Piloten ist GPS-Ausfall kein Notfall. Es ist eine außergewöhnliche Situation – aber eine, für die jahrelanges Training existiert.

Verkehrspiloten werden regelmäßig in Simulatoren mit Systemausfällen konfrontiert. GPS-Ausfall ist dabei eines der harmloseren Szenarien. Triebwerkausfall, Druckabfall, Feuer an Bord – das sind die Szenarien, die Schweiß kosten.

GPS-Ausfall über freiem Wasser, auf einer bekannten Route, mit funktionierenden Trägheitsnavigationssystemen? Das ist eine Routinestörung. Unangenehm, aber beherrschbar.

Die Gelassenheit im Cockpit in solchen Momenten ist kein Zufall. Sie ist das Ergebnis von Hunderten von Stunden im Simulator, in denen genau solche Situationen geübt wurden, bis die Reaktionen automatisch ablaufen.

Was Passagiere spüren

Nichts. Gar nichts.

Vielleicht ein leichtes Zögern bevor eine Durchsage kommt – oder auch keine Durchsage. GPS-Ausfall ist in den allermeisten Fällen kein Ereignis, das Passagiere betrifft. Das Flugzeug fliegt weiter. Die Getränke werden weiter ausgeschenkt. Die Erdnüsse landen weiter im Plastikschälchen. Der Flug landet mit hoher Wahrscheinlichkeit pünktlich am Zielort.

Es sei denn – und das ist der Punkt, auf den Kapitel 6 eingehen wird – die Störung ist nicht kurz und zufällig, sondern absichtlich, anhaltend und strategisch platziert.

Wann wird es wirklich gefährlich?

Es gibt Situationen, in denen GPS-Ausfall erheblich ernster ist als der oben beschriebene Reiseflug-Szenario.

Der Anflug auf einen Flughafen ist eine davon. Moderne Präzisionsanflüge – insbesondere in schlechter Sicht – verlassen sich auf GPS-basierte Navigationssysteme (GNSS-Anflüge). Wenn GPS beim Anflug ausfällt, muss auf weniger präzise Verfahren gewechselt werden. Das bedeutet: höhere Wetterminima, möglicherweise Ausweichen auf einen anderen Flughafen.

Helikopter in Berggebieten oder auf Offshore-Plattformen operieren in Umgebungen, in denen Fehler von wenigen Metern den Unterschied zwischen sicherem Anflug und Katastrophe machen können. GPS-Ausfall ist hier deutlich kritischer als auf Reiseflughöhe über der Ostsee.

Unbemannte Luftfahrzeuge (Drohnen) sind oft vollständig auf GPS angewiesen, weil sie keine menschliche Wahrnehmung als Backup haben. Für sie ist GPS-Ausfall akut gefährlich.

Aber für einen Linienflug auf Reiseflughöhe? Das Flugzeug bleibt in der Luft. Es bleibt navigierbar. Und wenn der Ausfall länger dauert, gibt es Protokolle.

Kapitel 6 – Die Ostsee ist kein Zufall

GPS als militärisches System

GPS ist kein ziviles System. Es wurde in den 1970er Jahren vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium entwickelt und ist bis heute unter militärischer Kontrolle. Die USA könnten das System jederzeit für zivile Nutzer abschalten oder degradieren – obwohl sie sich seit 2000 verpflichtet haben, es dauerhaft kostenlos bereitzustellen.

Diese historische Tatsache hat eine wichtige Konsequenz: Wer GPS stört, greift nicht nur die zivile Luftfahrt an. Er greift ein militärisches Navigationssystem an.

Und wer das weiß, versteht, warum GPS-Jamming im Baltikum kein harmloses Phänomen ist.

Jamming und Spoofing – zwei sehr unterschiedliche Bedrohungen

Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Arten, GPS zu stören, und es lohnt sich, den Unterschied zu kennen.

GPS-Jamming ist das Breitbandbeschießen: Ein Störsender überflutet die GPS-Frequenz mit Rauschen. Das GPS-Gerät kann die echten Satellitensignale nicht mehr herausfiltern und verliert die Position. Es weiß, dass es kein Signal hat – die Anzeige zeigt „kein GPS", und der Pilot schaltet auf andere Navigationsmittel um.

Jamming ist plump, aber wirksam. In einem Radius von wenigen Dutzend bis wenigen Hundert Kilometern um einen mittelstarken Störsender kann es alle GPS-Empfänger ausschalten. Und ein Störsender muss kein High-Tech-Gerät sein: In Online-Foren kursierten jahrelang Anleitungen für Jammer, die für unter 100 Euro gebaut werden können.

GPS-Spoofing ist erheblich raffinierter – und erheblich gefährlicher. Ein Spoofer sendet nicht Rauschen, sondern gefälschte GPS-Signale. Signale, die so aussehen wie echte Satelliten-Signale, aber falsche Positionsdaten enthalten.

Das GPS-Gerät merkt nichts. Es empfängt Signale, die technisch korrekt aussehen, und berechnet eine Position – die falsche. Das Flugzeug glaubt, es fliegt über dem Meer, während es in Wahrheit auf einen Berg zusteuert. Oder es glaubt, sich in 10.000 Metern Höhe zu befinden, obwohl die berechnete Position bereits auf dem Boden liegt.

Spoofing-Angriffe auf zivile Luftfahrzeuge wurden über dem östlichen Mittelmeer und über dem Baltikum dokumentiert. In manchen Fällen wurden Flugzeuge auf Positionen

„verschoben", die mitten in Militärflughäfen lagen – vermutlich als Test oder zur Verwirrung.

Die Ostsee-Situation

Seit 2022 – parallel zur Eskalation des Krieges in der Ukraine – haben GPS-Störungen über dem Baltikum erheblich zugenommen. Die Fälle sind dokumentiert, von Flugsicherheitsbehörden erfasst und in der Fachwelt intensiv diskutiert.

Die Störungen konzentrieren sich auf Gebiete nahe der russischen Enklave Kaliningrad und entlang der russisch-finnischen Grenze. Die Reichweite ist erheblich: Störungen wurden noch in Hochreiseflughöhe über Teilen Finnlands, Estlands und Lettlands gemeldet.

Was steckt dahinter? Militärische GPS-Störsysteme, die Russland für den Schutz seiner eigenen Systeme einsetzt, strahlen in einem Bereich aus, der weit in zivilen Luftraum reicht. Ob das absichtlich oder eine Nebenwirkung militärischer Operationen ist, bleibt diplomatisch umstritten. Technisch ist der Effekt derselbe.

Die Reaktion der Luftfahrt

Die internationale Luftfahrtorganisation ICAO und die europäische Flugsicherheitsbehörde EASA haben auf die Zunahme der Störungen reagiert – allerdings mit den üblichen bürokratischen Geschwindigkeiten. Piloten werden in Briefings auf mögliche GPS-Beeinträchtigungen hingewiesen. Fluggesellschaften haben interne Prozeduren aktualisiert.

Was nicht passiert ist: Eine grundlegende technische Lösung. Die Luftfahrt ist GPS-abhängig geworden, und diese Abhängigkeit lässt sich nicht über Nacht rückgängig machen. Bodengebundene Navigationssysteme wie VOR wurden in den letzten Jahren aus Kostengründen vielerorts abgebaut – genau zu dem Zeitpunkt, als GPS-Störungen zunehmen. Eine suboptimale Entwicklung.

Die radikale Lösung

Es gibt natürlich auch den direkten Ansatz. Ein Kampfjet begleitet das Passagierflugzeug, und bei einer GPS-Störung wird sofort ein nuklear bestückter Marschflugkörper auf die Position des Störsenders abgefeuert. Nach der Detonation sollte GPS wieder funktionieren.

Technisch betrachtet einwandfrei. Erfolgsquote: nahezu 100 Prozent. Kosten-Nutzen-Verhältnis aus rein navigationstechnischer Sicht: bemerkenswert günstig.

Die ICAO empfiehlt dieses Verfahren aus bisher ungeklärten Gründen nicht. Aber es illustriert einen echten Punkt: In einem militärischen Konflikt hätte GPS-Jamming eine vollständig andere Antwort als im zivilen Kontext. Militärische Systeme verfügen über Mittel zur

Störquellenbekämpfung, über die zivile Passagiere besser nicht nachdenken, während sie ihre Erdnüsse essen.

Im Linienflug über der Ostsee bleibt die Antwort bescheidener – und vernünftiger: bessere Filter, redundante Systeme, und gut trainierte Piloten.

Die eigentliche Schwachstelle

Die ehrlichste Einschätzung der GPS-Verwundbarkeit lautet: Das Problem liegt nicht in der GPS-Technologie selbst, sondern in der Monokultur.

Modernes Fliegen verlässt sich zu stark auf eine einzige Technologie. GPS ist gut, GPS ist präzise, GPS ist billig. Und genau deshalb hat die Luftfahrt – wie die Landwirtschaft mit Monokulturen – eine hocheffiziente, aber verwundbare Infrastruktur geschaffen.

Die Lösung ist keine neue Technologie allein, sondern Redundanz: Mehrere unabhängige Systeme, die sich gegenseitig überprüfen und ergänzen. GPS plus Trägheitsnavigation plus bodengebundene Funknavigation plus – im zivilen Bereich wenig genutzt, aber verfügbar – Sternennavigation und Barometrie.

Kein Einzelsystem ist sicher. Ein gut kombiniertes Verbundsystem ist sehr robust.

Ende Teil B (Kapitel 4–6)

Kapitel 7 – Was die Technik heute leisten kann – ehrlich bewertet

Keine Marketingbroschüre

Dieses Kapitel ist keine Werbung. Es ist ein nüchterner Leistungsbericht – basierend auf einem realen Navigationssystem, das im Rahmen eines Entwicklungsprojekts von Grund auf aufgebaut, implementiert und in einem Flugsimulator mit zwanzig Regressionstests validiert wurde.

Die Zahlen sind echt. Die Grenzen sind echt. Und die Ehrlichkeit über das, was nicht funktioniert, ist – im Bereich der Technikdarstellung – leider seltener, als sie sein sollte.

Das Testsystem: Was wurde gebaut?

Das System, das dieser Bewertung zugrunde liegt, ist ein Navigationssystem für ein Kleinflugzeug, aufgebaut aus handelsüblichen MEMS-Sensoren. Die Hardware:

- **Gyroskop und Beschleunigungsmesser:** ICM-42688, ein moderner MEMS-Chip für etwa 15 Euro. Misst Drehrate und Beschleunigung auf drei Achsen, 1000 Mal pro Sekunde.
- **Magnetometer:** MMC5983MA – misst das Erdmagnetfeld für die Kursbestimmung.
- **Barometrischer Höhensensor:** BMP390 – misst den Luftdruck, daraus die Höhe.
- **GPS-Empfänger:** Standard-Modul, vier Positionsupdates pro Sekunde.

Gesamtkosten der Hardware: unter 50 Euro. Das ist der Punkt, der noch vor zwanzig Jahren unvorstellbar gewesen wäre.

Die Software: Ein selbst entwickelter Kalman-Filter mit 16 Zustandsvariablen – also 16 Größen, die gleichzeitig geschätzt und laufend korrigiert werden. Darunter Position, Geschwindigkeit, Lage, aber auch die Fehler der Sensoren selbst (Bias, Drift) – das System schätzt also nicht nur, wo das Flugzeug ist, sondern auch, wie falsch seine eigenen Sensoren gerade messen.

Der entscheidende Test: 150 Sekunden GPS-Ausfall

Der aussagekräftigste Test war der GPS-Ausfall-Test. Das Flugzeug fliegt eine Platzrunde – eine standardisierte Rechteckbahn um einen Flughafen, etwa 3 Kilometer × 1,5 Kilometer groß. Während des Fluges fällt GPS für exakt 150 Sekunden aus.

Nach diesen 150 Sekunden: Wie weit ist die geschätzte Position von der wahren Position entfernt?

Ergebnis ohne Kalman-Filter (nur rohe Trägheitsnavigation):

1258 Meter Positionsfehler.

Das entspricht etwa zwölf Fußballfeldern. Das Flugzeug würde glauben, sich an einem völlig anderen Ort zu befinden.

Ergebnis mit Kalman-Filter:

37 Meter Positionsfehler.

Weniger als die Länge eines Fußballfeldes. Nach zweieinhalb Minuten GPS-Ausfall.

Das ist ein Verbesserungsfaktor von 34. Nicht als Idealwert unter perfekten Bedingungen – als robustes Ergebnis, das in zwanzig verschiedenen Testszenarien bestätigt wurde.

Was den Unterschied macht

Der Kalman-Filter leistet so viel mehr, weil er mehrere Dinge gleichzeitig tut:

Er schätzt den Fehler der Sensoren mit. Das klingt banal, ist aber entscheidend. Ein Gyroskop hat einen Bias – einen systematischen Fehler, der in eine bestimmte Richtung zieht. Wenn der Filter diesen Bias kennt und berücksichtigt, kann er ihn herausrechnen. Während GPS noch läuft, „lernt" der Filter den Bias der Sensoren. Wenn GPS ausfällt, wendet er dieses Wissen an.

Er nutzt alle verfügbaren Messwerte. Barometer, Magnetometer, Staudruck-Sensor – alle liefern Information, die der Filter einbezieht. Keine Quelle ist perfekt, aber zusammen ergeben sie ein konsistenteres Bild.

Er weiß, wie unsicher er ist. Diese Selbstreflexion ist vielleicht die wichtigste Eigenschaft. Ein System, das seine eigene Unsicherheit kennt, kann ehrlich kommunizieren, wie vertrauenswürdig seine Ausgabe ist. Das ist für die Sicherheit entscheidend.

Die Grenzen – klar benannt

Jetzt die unbequemen Wahrheiten.

150 Sekunden sind nicht 30 Minuten. Der Test lief zweieinhalb Minuten. Bei längerem GPS-Ausfall wächst der Fehler weiter – langsamer als ohne Filter, aber er wächst. Nach zehn Minuten würde der Fehler deutlich über 37 Meter liegen. Nach einer Stunde wären wir in Bereichen, die für präzise Navigation unbrauchbar sind.

Billige MEMS-Sensoren haben Grenzen. Der beschriebene Aufbau für unter 50 Euro leistet Beachtliches. Aber ein professionelles Trägheitsnavigationssystem für 50.000 Euro driftet erheblich langsamer. Die Qualität der Hardware setzt die Grenze dessen, was Software herausrechnen kann.

Magnetometer sind störanfällig. Metall in der Nähe, elektrische Leitungen, Störfelder – all das verfälscht die Kursbestimmung durch das Magnetometer. In einem Flugzeug, das voller elektrischer Systeme ist, ist das eine reale Herausforderung.

Der Filter ist nur so gut wie sein Modell. Ein Kalman-Filter basiert auf einem mathematischen Modell des Systems. Wenn das Flugzeug etwas tut, das im Modell nicht vorgesehen ist – zum Beispiel extreme Manöver, Stall, Turbulenzen –, kann der Filter unzuverlässig werden.

Was das für die Praxis bedeutet

Für einen Linienflug auf Reiseflughöhe ist der beschriebene Leistungsbereich mehr als ausreichend. Ein Positionsfehler von 37 Metern nach zweieinhalb Minuten GPS-Ausfall ist für die Routennavigation auf 10.000 Metern irrelevant. Das Flugzeug ist noch sehr weit vom nächsten Hindernis entfernt.

Kritisch wird es erst, wenn:

- der GPS-Ausfall länger als fünf bis zehn Minuten dauert,
- man sich in der Nähe von Bergen oder anderen Hindernissen befindet,
- man einen Präzisionsanflug durchführen muss.

In all diesen Fällen gibt es Ausweichprozeduren. Kein modernes Verkehrsflugzeug ist so gebaut, dass es bei GPS-Ausfall kopflos wird.

Kapitel 8 – Was der Pilot kann, was er nicht kann – und was ihn schützt

Der Mensch im System

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Luftfahrt mit beeindruckender Konsequenz automatisiert. Moderne Flugzeuge können starten, Kurs halten, sinken und landen – alles vollautomatisch. In manchen Betriebsarten sitzt der Pilot hauptsächlich dort, um das System zu überwachen und einzugreifen, wenn etwas Unerwartetes passiert.

GPS-Ausfall ist genau so ein Moment: ein Moment, in dem die Automatik eingeschränkt ist und der Pilot wieder mehr in den Vordergrund tritt. Und es ist ein Moment, für das Piloten explizit ausgebildet werden.

Was ein gut ausgebildeter Pilot in dieser Situation tut

Die erste Reaktion ist keine Panik, sondern Situationsbewusstsein – auf Englisch *Situational Awareness*, abgekürzt SA. Der Pilot stellt fest, was er hat und was er nicht hat.

Hat er: funktionierende Triebwerke, stabile Lage, funktionierende Trägheitsnavigation, bodengebundene Funknavigation (VOR/DME), Sprechfunk zur Flugsicherung.

Hat er nicht: präzise GPS-Position.

Aus dieser Bestandsaufnahme folgen klar definierte Schritte: Flugsicherung informieren. Auf alternative Navigation umschalten. Flughöhe halten. Kurs halten.

Das klingt einfach – und in einer normalen Situation ist es das auch. Die Kunst liegt darin, diese einfachen Schritte auch dann korrekt auszuführen, wenn gleichzeitig andere Dinge passieren: Schlechtwetter, müde Besatzung, nervöse Passagiere.

Was den Piloten schützt: das System hinter dem System

Einzelne Piloten machen Fehler. Das ist keine Kritik – es ist eine Tatsache über Menschen. Deshalb ist die moderne Luftfahrt so konstruiert, dass ein einzelner Fehler selten zu einem Unfall führt. Es braucht typischerweise eine Kette von Fehlern.

Die Werkzeuge, die diese Sicherheitskette aufbauen:

Zwei Piloten im Cockpit: Nicht weil einer den Flieger nicht alleine fliegen könnte, sondern weil zwei Augen und zwei Gehirne Fehler abfangen, die einem allein passieren würden. Einer fliegt, einer überwacht. Bei Unklarheiten: Rückfrage. Bei Unstimmigkeiten: Diskussion.

Checklisten: In der Luftfahrt sind Checklisten keine lästige Bürokratie, sondern ein kognitives Sicherheitsnetz. Sie stellen sicher, dass auch unter Stress kein Schritt vergessen wird. Die Checkliste für GPS-Ausfall ist kurz, klar und geübt.

Flugsicherung: Die Flugsicherung kennt den Flugzeugbestand. Bei GPS-Ausfall-Meldung kann sie sekundäres Radar einsetzen (Radar, das nicht GPS-abhängig ist) und dem Piloten Radar-Vektoren geben – also direkte Kursanweisungen basierend auf Bodenradar. In dicht besiedeltem Luftraum wie Europa ist das eine verlässliche Absicherung.

Mindestsicherheitshöhen (MSA): Kein Flugzeug darf in einem definierten Bereich unterhalb einer bestimmten Höhe fliegen – auch wenn der Pilot wollte. Diese Mindesthöhen berücksichtigen alle Hindernisse in der Umgebung. Solange das Flugzeug über der MSA bleibt, gibt es kein Kollisionsrisiko mit dem Boden.

Die ehrliche Antwort auf die Frage: Wie gefährlich ist es?

Für einen Linienflug, auf Reiseflughöhe, über dem Baltikum, mit erfahrener Besatzung und modernem Flugzeug:

GPS-Ausfall ist kein Notfall.

Es ist eine außergewöhnliche Situation, die Aufmerksamkeit erfordert und in der Protokolle ausgeführt werden. Aber die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Ausfall zu einem Unfall führt, ist verschwindend gering. Die redundanten Systeme, die ausgebildeten Piloten und die Flugsicherung bilden ein Sicherheitsnetz, das außerordentlich robuster ist, als es Zeitungsartikel über GPS-Störungen vermuten lassen.

Das heißt nicht, dass GPS-Störungen harmlos wären. Sie sind ein ernstes Problem:

- Sie erhöhen die Arbeitsbelastung der Piloten.
- Sie können zu Unregelmäßigkeiten bei An- und Abflügen führen.
- In Extremfällen können sie Ausweichentscheidungen erzwingen, die teuer und störend sind.
- Für kleinere, weniger gut ausgerüstete Flugzeuge ist das Risiko größer.

Aber eine dunkle Nacht über der Ostsee, GPS weg, Piloten schlafen – dieses Bild ist Fiktion. In Wirklichkeit schlafen die Piloten nicht, die Systeme arbeiten weiter, und das Training greift genau dann, wenn es gebraucht wird.

Was sich ändern muss – und was sich bereits ändert

Die Luftfahrtgemeinschaft hat die GPS-Vulnerabilität als strukturelles Problem erkannt. Die Antworten sind noch im Entstehen, aber sie sind real:

Mehr Redundanz: Neue Flugzeuge werden mit mehreren unabhängigen Navigationssystemen ausgestattet, die sich gegenseitig überprüfen.

Bessere Filter: Kalman-Filter der nächsten Generation schätzen nicht nur die Sensorbiase, sondern modellieren das gesamte Fehlerprofil des Systems über Zeit. Verbesserte Algorithmen können längere GPS-Ausfälle kompensieren.

Bodengebundene Infrastruktur: Mehrere europäische Länder diskutieren die Wiederinbetriebnahme von eLoran – einem Langwellen-Navigationssystem, das unabhängig von GPS und praktisch nicht störbar ist.

Internationale Diplomatie: GPS-Jamming im Baltikum ist mittlerweile regelmäßig Thema in ICAO-Gremien und bilateralen Gesprächen. Kurzfristige Lösungen sind nicht in Sicht – aber das Problem ist benannt.

Epilog – Zurück über der Ostsee

Die Szene bekommt ihr Ende

Es ist 3:51 Uhr. Das GPS-Symbol bleibt gelb. In den letzten vierunddreißig Minuten hat die Besatzung routiniert auf bodengebundene Navigation umgeschaltet, die Flugsicherung informiert und den Kurs mit leicht erhöhter Aufmerksamkeit gehalten.

Der Erste Offizier hat seinen Kaffee ausgetrunken. Der Kapitän hat zweimal mit der Flugsicherung Helsinki gesprochen.

Um 3:58 Uhr wechselt das Symbol zurück auf grün. *GPS POSITION ACQUIRED.* Das FMS übernimmt sofort die aktualisierte Position. Die Abweichung gegenüber der intern berechneten Trägheitsnavigation: 1,2 Kilometer. Für einen Reiseflug auf 11.000 Metern: irrelevant.

Um 5:23 Uhr landet der Flug in Hamburg. Planmäßig.

Was die Passagiere erlebt haben: Einen ruhigen Flug. Etwas Turbulenzen über der dänischen Küste. Und bei Reihe 27 einen leicht zu lauten Schnarcher.

Was die Besatzung erlebt hat: Eine GPS-Störung, die im Handbuch steht, für die trainiert wurde, und die ohne Ereignis vorübergegangen ist.

Was wirklich auf dem Spiel steht

Die Geschichte dieser Nacht ist gut ausgegangen – und sie geht fast immer gut aus. Aber das ist kein Grund zur Selbstgefälligkeit.

GPS-Störungen nehmen zu. Die Abhängigkeit der zivilen Infrastruktur von GPS nimmt ebenfalls zu – nicht nur in der Luftfahrt, sondern in der Logistik, im Finanzwesen (GPS-Zeitstempel sind für Transaktionen wichtig), in der Telekommunikation, in der Landwirtschaft.

Eine Gesellschaft, die eine kritische Infrastruktur auf ein einziges, leicht störbares System aufbaut, schafft eine Schwachstelle. Nicht für den Normalfall – der Normalfall funktioniert. Sondern für den Störfall, der kommt, wenn jemand diese Schwachstelle ausnutzen will.

Die Technik, die in diesem Buch beschrieben wurde – Kalman-Filter, Sensorfusion, redundante Navigation – ist ein Teil der Antwort. Aber nur ein Teil. Der andere Teil ist

politisch: die Bereitschaft, in Redundanz zu investieren, auch wenn es teurer ist, auch wenn GPS gerade funktioniert.

Eine letzte Zahl

37 Meter.

Das ist der Positionsfehler, den ein gut implementiertes GPS/IMU-System mit Kalman-Filter nach zweieinhalb Minuten GPS-Ausfall macht. Mit Hardware, die zusammen weniger als ein gutes Abendessen kostet.

37 Meter. In einer Welt, die über Kilometer navigierte, bevor GPS erfunden wurde.

Das ist, was Technik leisten kann, wenn sie sorgfältig gebaut, ehrlich getestet und nüchtern bewertet wird.

Das Flugzeug über der Ostsee hat noch 37 Meter Spielraum. Es weiß, wo es ist. Es weiß, wie unsicher es ist. Und es fliegt weiter.

Anhang – Für Neugierige

Dieser Anhang ist freiwillig. Er richtet sich an Leser, die tiefer einsteigen möchten. Das Buch ist ohne diesen Anhang vollständig.

A – Wie ein Kalman-Filter wirklich rechnet

Im Kern arbeitet der Kalman-Filter in zwei alternierenden Schritten, die sich ununterbrochen wiederholen:

Schritt 1: Vorhersage (Predict)

Der Filter nimmt seinen aktuellen Kenntnisstand – wo ist das Flugzeug, wie bewegt es sich – und berechnet, wo es eine Zehntelsekunde später sein wird. Diese Vorhersage ist nicht perfekt: Sie basiert auf einem Modell des Flugzeugs, und Modelle sind immer vereinfacht. Deshalb merkt sich der Filter auch, wie unsicher seine Vorhersage ist.

Schritt 2: Korrektur (Update)

Eine neue Messung kommt herein – zum Beispiel ein GPS-Positionsupdate. Der Filter vergleicht diese Messung mit seiner Vorhersage. Wenn sie übereinstimmen: gut. Wenn nicht: er verschiebt seine Schätzung ein Stück in Richtung der Messung. Wie weit er sich verschiebt, hängt davon ab, wie vertrauenswürdig er die Messung einschätzt (die sogenannte Kalman-Verstärkung).

Nach dem Update hat der Filter eine verbesserte Schätzung. Mit dieser geht er in die nächste Vorhersage. Und so weiter – tausend Mal pro Sekunde.

B – Was MEMS bedeutet und warum es revolutionär ist

MEMS steht für Micro-Electro-Mechanical Systems – mikroelektromechanische Systeme. Das sind winzige mechanische Strukturen, die in Silizium geätzt werden – mit denselben Prozessen, die auch Computerchips herstellen.

Ein MEMS-Gyroskop enthält eine mikroskopische schwingende Struktur, kleiner als ein menschliches Haar. Wenn sich die Platine dreht, wirkt die Corioliskraft auf diese Struktur. Diese Kraft wird als Kapazitätsänderung elektrisch gemessen – und daraus wird die Drehrate berechnet.

Die Revolution liegt in der Skalierung: Was früher ein teures, empfindliches Präzisionsgerät war, kostet heute wenige Euro und sitzt in jedem Smartphone. Das hat nicht nur die Navigation demokratisiert, sondern auch Robotik, Spielzeugdrohnen, Fitness-Tracker und Dutzende anderer Anwendungen erst ermöglicht.

C – Warum Quaternionen besser sind als Euler-Winkel

Um die Lage eines Flugzeugs zu beschreiben, braucht man drei Zahlen: Roll (seitliche Neigung), Nick (Nase hoch/runter) und Gier (Richtungsänderung). Diese drei Zahlen nennt man Euler-Winkel.

Das klingt einfach – und für die Anzeige im Cockpit ist es auch einfach. Aber für die Berechnung im Computer hat diese Darstellung eine fatale Schwäche: den Gimbal-Lock.

Gimbal-Lock tritt auf, wenn das Flugzeug exakt senkrecht nach oben oder unten zeigt. In dieser Position werden Roll und Gier ununterscheidbar – das mathematische System kollabiert. Das ist für normale Flugzeuge selten relevant, aber für Kampfjets oder Modellflugzeuge durchaus möglich.

Quaternionen sind eine alternative mathematische Darstellung der Lage, die keinen Gimbal-Lock kennt. Sie bestehen aus vier Zahlen statt drei und sind für den Computer effizienter zu verarbeiten. Der Nachteil: Sie sind für Menschen schwer intuitiv zu verstehen. (Was bedeutet ein Quaternion von [0,707; 0; 0,707; 0] anschaulich? Fast niemand kann das sofort sagen.)

Die Lösung in der Praxis: Intern rechnet der Computer mit Quaternionen (präzise, effizient, kein Gimbal-Lock). Für die Anzeige und für den Piloten werden sie in Euler-Winkel umgerechnet (anschaulich, verständlich). Das Beste aus beiden Welten.

D – Weiterführende Lektüre

Wer tiefer in die Materie einsteigen möchte:

Populärwissenschaftlich:

- „The Smartest Kids in the World" von Amanda Ripley – kein Navigationsbuch, aber ein hervorragendes Beispiel, wie man komplexe Systeme verständlich erklärt.

Einführend-technisch:

• „Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications" von Elliott Kaplan und Christopher Hegarty – der Standardeinstieg in GPS-Technologie, gut verständlich für technisch Interessierte ohne Spezialkenntnisse.

• „Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors" von Jay Farrell – solide Einführung in Sensorfusion und Kalman-Filter für Navigation, etwas mathematischer.

Für ernsthaft Interessierte:

• „Optimal State Estimation" von Dan Simon – das Standardwerk zum Kalman-Filter, mathematisch sauber, mit vielen praktischen Beispielen.

• „Strapdown Inertial Navigation Technology" von David Titterton und John Weston – die Bibel der Trägheitsnavigation, nichts für schwache Nerven.

Online:

• Die Wikipedia-Artikel zu Kalman-Filter und Inertial Navigation System sind ungewöhnlich gut und eignen sich als erste Vertiefung.

• Das Rymberg Navigation Lab (TU Delft) stellt offene Lehrmaterialien zur Sensorfusion bereit.

E – Glossar der wichtigsten Begriffe

Accelerometer / Beschleunigungsmesser: Sensor, der die Beschleunigung auf einer oder mehreren Achsen misst. In MEMS-IMUs typischerweise drei Achsen.

Bias: Systematischer Messfehler, der konstant in eine Richtung zeigt. Ein Gyroskop mit positivem Bias „glaubt", es drehe sich leicht nach rechts, auch wenn es stillsteht.

Dead Reckoning / Koppelnavigation: Navigation durch Fortschreiben einer bekannten Startposition auf Basis von Kurs und Geschwindigkeit, ohne externe Referenz.

DME (Distance Measuring Equipment): Bodengebundenes Funknavigationssystem, das die Schrägentfernung zu einer Bodenstation misst. Unabhängig von GPS.

ES-EKF (Error-State Extended Kalman Filter / Fehlerzustands-Erweiterter-Kalman-Filter): Spezielle Kalman-Filter-Variante, die nicht den absoluten Zustand schätzt, sondern den Fehler des Zustands. Für Inertialnavigation besonders geeignet.

Gyroskop: Sensor, der die Drehrate um eine Achse misst. MEMS-Gyroskope nutzen den Coriolis-Effekt einer schwingenden Masse.

ILS (Instrument Landing System): Bodengebundenes Landehilfssystem für Präzisionsanflüge bei schlechter Sicht. Unabhängig von GPS.

IMU (Inertial Measurement Unit / Inertiale Messeinheit): Kombination aus drei Beschleunigungsmessern und drei Gyroskopen auf drei Achsen. Misst Beschleunigung und Drehrate des Trägerfahrzeugs.

IRS (Inertial Reference System): In der kommerziellen Luftfahrt verwendete Bezeichnung für eine hochwertige IMU mit eingebettetem Navigationsrechner.

Jamming: Absichtliches Stören eines Funksignals durch Überstrahlen mit Rauschen. Bei GPS-Jamming werden die Satellitensignale durch ein stärkeres Störsignal überdeckt.

Kalman-Filter: Mathematischer Algorithmus zur optimalen Schätzung eines Systemzustands aus mehreren unsicheren Messquellen. Entwickelt 1960 von Rudolf Kálmán.

MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems): Miniaturisierte mechanische Strukturen in Halbleitertechnik. MEMS-Sensoren sind die Grundlage moderner, kostengünstiger IMUs.

NED (North-East-Down): In der Luftfahrt verbreitetes Referenzkoordinatensystem mit x-Achse nach Norden, y-Achse nach Osten, z-Achse nach unten.

Quaternion: Mathematische Darstellung einer Rotation im Raum durch vier Zahlen. Ohne Singularitäten (im Gegensatz zu Euler-Winkeln), aber weniger intuitiv.

Spoofing: Gefälschte GPS-Signale, die echten Satellitensignalen täuschend ähnlich sind, aber falsche Positionsdaten enthalten. Gefährlicher als Jamming, weil das Empfangsgerät den Angriff nicht erkennt.

Strapdown-Algorithmus: Verfahren zur Berechnung von Lage, Geschwindigkeit und Position aus IMU-Messdaten durch numerische Integration.

VOR (VHF Omnidirectional Range): Bodengebundenes Funknavigationssystem, das die magnetische Peilung zur Bodenstation liefert. Unabhängig von GPS, seit Jahrzehnten in Betrieb.

Ende des Buches

Blind fliegen? Was passiert, wenn GPS ausfällt – und was die Technik dagegen tut

Erste Ausgabe

Dipl.-Inform. (FH) Gerd Schmitt

info@sc-sarl.com

sc-sarl.com/de/index.html